湿地松无性系松脂组分分析及评价[1]

张文娟[1]，丁伟[2]，付宇新[2]，张志红[3]，周光[2]，李火根[1]，杨春霞[2*]

(1. 南京林业大学林木遗传与生物技术教育部重点实验室，南京林业大学南方现代林业创新中心，南京 210037；2. 江西省林业科学院林木遗传育种与栽培研究所，南昌 330032；3. 峡江县林木良种场，江西 吉安 331409)

摘要：为从湿地松种子园现有的速生材用无性系中选择产脂力强、松脂品质高的优良无性系，高效利用湿地松良种资源，以湿地松第一代种子园内 36 个无性系为材料，测定其松脂质量流速以及胸径生长量，并进一步采用 GC-MS 分析其松脂成分，基于上述指标利用相关性分析、聚类分析对参试 36 个无性系进行综合评价。结果显示：（1）共鉴别出了 21 种松脂成分，其中包括 8 种单帖成分，13 种二萜组分。（2）相关性分析表明，松脂质量流速（RMR）与单萜含量显著正相关，与枞酸型树脂酸呈弱的负相关，与海松酸型树脂酸无明显关联。（3）从松节油含量、松脂质量流速、枞酸型树脂酸、海松酸型树脂酸 4 个维度对参试无性系进行聚类分析，可将 36 个无性系分为 3 大类，且各类型间差异显著，第 1 类的表现要远好于其他 2 类。（4）在产脂力高的基础上， 6-44、4-11-1、1-38、3-64 等 4 个无性系单萜含量高；4-11-1、3-64、2-0420、3-468 等 4 个无性系海松酸型树脂酸含量高；而无性系 2-173 枞酸型树脂酸含量较高。综上表明，该研究定性分析了湿地松的松脂成分，定量评估了 36 个无性系的产脂力与组分含量，为湿地松脂用无性系选择奠定了基础。

关键词：湿地松，松脂成分，相关性，聚类分析，产脂力

中图分类号：**Q37**　　**文献标识码**：A　　文章编号：

Evaluation and analysis of resin composition of *Pinus elliottii* clones

ZHANG Wenjuan[1], DING Wei[2], FU Yuxin[2], ZHANG Zhihong[3], ZHOU Guang[2], LI Huogeng[1], YANG Chunxia[2*]

(1. *Key Laboratory of Forest Genetics & Biotechnology of Ministry of Education, Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China* , *Nanjing Forestry University*, Nanjing 210037, China；2. *Institute of Forest Genetic Breeding and Cultivation, Jiangxi Academy of Forestry*, Nanchang 330032, China；3. *Jiangxi Ji'an County Forest Tree Seed Farm*, Ji'an 331409, Jiangxi, China)

Abstract: In order to select superior clones with strong resin-producing capacity and high resin-quality from the existing fast-growing timber clones in seed orchard of *Pinus elliottii*, and to make high use of crop germplasm resource,36 clones in the first generation of slash pine seed orchard were used as materials to determine their resin yield, resin mass flow rate and DBH growth, and to analyze their resin composition by GC-MS. Based on the above indicators, correlation analysis and cluster analysis was used to comprehensively evaluate the production and quality of resin among 36 clones. The results were as follows: (1) There were a total of 21 pine resin components, including 8 monoterpenes and 13 diterpenes. (2) Correlation analysis showed that the resin mass flow rate (RMR) had significant and positive correlation with the total content of monoterpene, weakly negatively correlates to abietic-type resin acid, and not significantly correlated to pimaric-type resin acid. (3) Based on the cluster analysis results integrating four types of indicators as the total monoterpene content, resin mass flow rate, abietic-type resin acid and pimaric-type resin acid, 36 clones could be divided into three categories and the difference between each type is significant. The performance of Class 1 was much better than that of the other two categories. (4) There were 17 high-resin yield pine clones (ERM≥15.15) among 36 clones, and on the basis of this, four clones (6-44, 4-11-1, 1-38 and 3-64) display higher monoterpenes content, while four clones (4-11-1, 3-64, 2-0420, 3-468) showed higher contents of pimaric-type resin acid. And the content of abietic-type resin acid of clone 2-173 was the highest. In summary, a total of 21 pine resin components of *P. elliottii* were identified, and 36 clones were evaluated based on four indicators: the total monoterpene content, resin mass flow rate, abietic-type resin acid and pimaric-type resin acid. We not only analyzed qualitatively the resin composition but also evaluated quantitatively the resin-producing capacity of 36 clones in slash pine seed

基金项目：国家重点研发计划子课题（2022YFD2200204-4）；院青年科技人才培养项目（2023522901）。

第一作者：张文娟（1996-），硕士研究生，研究方向为林木遗传育种, (E-mail) ellanz@126.com。

***通信作者**：杨春霞，博士，研究员，研究方向为林木遗传育种, (E-mail) yangcx0812@126.com。

orchard. Our findings provide the scientific references for the targeted breeding of pine resin components and lay a foundation for subsequent heredity breeding and gene improvement of *P. elliottii.*
Key words: *Pinus elliottii,* chemical constituents of pine resin, correlation, cluster analysis, resin-producing capacity

松脂是松树的副产物，主要加工成松香和松节油等经济产品，用途广泛，是化工、电子、航天、食品、医疗等行业的重要原料，在国民经济中占据重要地位（Neis et al., 2018）。我国是松脂生产及出口大国，湿地松（*Pinus elliottii*）作为我国重要的采脂树种之一，针对其松脂成分的研究及改良自上世纪 80 年代就已开始（雷蕾等，2015a）。湿地松松脂的主要成分为非挥发性松香和挥发性松节油，松香中的海松酸具有杀菌作用，可用于制备抗癌药品（Lai et al., 2020）。松节油的含量常常作为判断松脂质量的标准之一，其含量越高，代表松脂品质越好。松节油中的一些成分，比如β蒎烯不仅在生物燃料方面有潜在价值，还可以合成香料，是重点研究的成分之一（雷蕾等，2015b）。同时，多项研究表明，湿地松单萜及双萜类的主要成分受到中等或者较强的遗传因素控制，所以针对松脂成分的选择性育种是可行的（李彦杰等，2012a; Lai et al., 2020）。

湿地松松脂产量高低常用产脂力来衡量，产脂力受到较强的遗传因素控制（吴东山等，2019；张建忠等，2010），因此高产脂良种的选育十分重要。高产脂优树的鉴别是湿地松的产脂性状改良的关键一环，传统的方法是通过下降式割脂法来收集个体的产脂量或产脂力数据，但是这种方式可能会影响树木的生长，且耗时费力，Neis 等（2019）建立了一种使用树脂质量流速（Resin mass flow rate, RMR）分析快速识别高产脂个体的方法，并验证了这一方法的可靠性。 Yi 等(2020)试验也证明了其可靠性，这种方法主要是测量树干上的小面积伤口在短时间内（4 h）流出的松脂质量（RMR），而研究表明高产脂无性系的 RMR 要显著高于低产脂无性系（Yi et al., 2020）。在以上研究中，主要探讨了 RMR 与松脂产量之间的相关性，并未讨论其与松脂成分之间的关系，并且，在以往湿地松高产脂良种选育研究中，多注重产脂力或产脂量数据，很少关注松脂组分，尤其是在针对不同松脂组分为目标的良种选育研究更少。

江西省作为全国湿地松种植面积最大的省份，现有良种多以速生、材用等为主，高产脂湿地松良种缺乏。因此，为了开发现有的速生材用良种的脂用价值，本研究以江西省峡江县林木良种场第一代湿地松种子园中 36 个无性系作为研究材料，测定 36 个湿地松无性系的松脂质量流速、松脂组分与胸径生长量，通过相关性分析、聚类分析的方法，主要探讨以下 3 个问题：（1）湿地松松脂的组成成分有哪些;（2）树脂质量流速与松脂成分之间有何关系;（3）产脂性状在湿地松无性系间是否存在差异。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料来自江西省峡江县林木良种场湿地松一代种子园（良种编号为 GLS 赣湿 1 号），该种子园建于 1980 年，原有 55 个无性系，现保存有 43 个无性系，选择其中长势好、干形通直的 36 个无性系作为试验材料。种子园位于江西省峡江县水边镇（115°24′ E、27°33′ N），属于中亚热带季风气候，全年日照 1 752 h，年平均气温 17.7 ℃，10 ℃以上有效积温持续 250 d，年平均降雨量 1 557.9~1 700 mm，年蒸发量 1 458.8 mm。该基地气候温和，雨量丰富，光照充分，四季分明，一年无霜期长达 277 d，十分适宜湿地松生长。

1.2 松脂采集及胸径测量

选择种子园内生长较好、干形通直的 36 个无性系，使用胸径尺进行胸径的测量，并且在同一日通过松脂收集装置（李彦杰等，2012b）采集松脂，在树干的胸径处（h=1.3 m）打三个斜向上的孔，固定一个 15 mL 离心管用于收集流出的松脂。在 4 h 后将离心管取下，立即盖上盖子，为了避免相关成分挥发造成影响，尽快对松脂进行称重，称重后置 4 ℃冰箱中用于松脂成分测定。

1.3 松脂成分分析

取大约 0.05 g 松脂样品进行甲酯化处理，加入无水乙醇和 25% 四甲基氢氧化铵溶液，用酚酞作为指示剂直至液体变红，放入 PE 气相色谱-质谱分析仪（Clair GC 680-MS 600）中。色谱条件为 Elite-5MS 石英毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）。程序设定起始温度为 60 ℃，持续 2 min；以 5 ℃·min^{-1} 的速度升温至 80 ℃；再以 30 ℃·min^{-1} 的速度升温到 230 ℃；最后以 5 ℃·min^{-1} 的速度升到 260 ℃，持续 10 min。

进样条件：进样口温度为 250 ℃，进样量 1 μL，分流比 30:1，载气为高纯氦气（1 mL·min-1）。

电子电离质谱分析条件：溶剂延迟 3 min，电子能量 70 eV，离子源温度 230℃，传输线温度 280 ℃，扫描质量范围 35~620 amu。

1.4 数据分析

松脂成分分析：使用气质联用仪自带的数据库和相关文献进行松脂成分的定性分析，各组分的相对含量通过峰面积归一法计算。

树脂质量流速（RMR）：用 4 h 内收集的松脂的质量来表示。

相关性分析：用 SPSS 软件检验数据是否符合正态分布，符合正态分布的数据用皮尔逊相关系数进行相关性计算。

聚类分析：使用 SPSS 软件，采用 K-means 聚类方法，以定量数据作为标准对样品进行聚类。

多重比较：将聚类的各分组数据与总体平均值分别进行 t 检验，P<0.05 时表示两组样本平均值之间差异性显著。

2 结果与分析

2.1 松脂组分及相关性状差异分析

利用 GC-MS 技术共鉴定出了 21 种松脂成分，其中包括 8 种单帖成分，13 种二萜组分。除了柠檬烯和长叶松酸，其他成分在绝大部分无性系中都能鉴别出来。单帖类物质的含量在 13.87 ~ 21.29%，平均值为 17.32%。其中主要成分为α-蒎烯和β-蒎烯，约占单帖类组分的 90%。双萜类物质占所有组分的含量在 68.11%~80.96%，平均值为 74.20%，其中海松酸型树脂酸占 8.29%，枞酸型树脂酸的含量为 64.30%。从表中数据可以看出，含量相对较低的成分比含量高的组分的变异系数普遍要高。在含量超过 1%的组分中，变异系数最高的 3 个成分为水芹烯、β-蒎烯、去氢枞酸，这也表示它们有较高的选择潜力。关于树脂质量流速和胸径这两个性状，可以看出树脂质量流速（RMR）在不同无性系间的差异较大，是适合选择的指标（见表 1）。

表 1 松脂成分及相关性状的基本特征

Table 1 Basic statistics of turpentine composition and related traits

松脂成分 Turpentine composition	项目 Project	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV (%)
单萜类组分 Monoterpenes	α-蒎烯 α-Pinene	5.14	10.67	8.62	1.22	14.11
	莰烯 Camphene	0.05	0.29	0.22	0.04	18.23
	蒈烯 Carene	0	0.22	0.07	0.05	69.32
	β-蒎烯β-Pinene	3.26	10.59	6.39	1.52	23.72
	月桂烯 Myrcene	0.21	0.39	0.29	0.04	15.11
	柠檬烯 Limonene	0	0.30	0.07	0.11	166.19
	水芹烯 Phellandrene	0.20	4.42	1.29	1.03	79.91
	草蒿脑 Estragole	0.09	0.71	0.38	0.16	41.74
	总和 Total	13.87	21.29	17.32	1.58	9.15
双萜类组分 Diterpenes	湿地松酸 Elliotinoic acid	0.08	0.23	0.14	0.03	23.32
	山达海松酸 Sandaracopimaric acid	0.17	1.61	0.76	0.35	45.50
	去氢枞醛 Dehydroabietic	0.14	2.83	0.64	0.52	81.62

aldehyde					
异海松酸 Isopimaric acid	5.54	9.85	7.39	0.76	10.22
海松酸型树脂酸 Pimaric-type resin acid	6.74	10.16	8.29	0.65	7.84
左旋海松酸 Levopimaric acid	33.2	41.88	37.35	2.07	5.54
长叶松酸 Palustric acid	0	1.77	0.11	0.37	327.45
去氢枞酸 Dehydroabietic acid	2.19	4.99	3.29	0.68	20.58
枞酸 Acetic acid	5.15	9.35	7.61	1.03	13.58
新枞酸 Neoabietic acid	13.09	18.26	14.65	1.05	7.17
15-羟基去氢枞酸 15-Hydroxy-dehydroabietic acid	0	0.82	0.16	0.17	103.34
南亚松酸 Mercusicacid	0.08	2.98	0.97	0.63	65.29
7, 13, 15-枞三烯酸 7, 13, 15-abietatrienoic acid	0.33	1.56	0.80	0.28	34.77
二氢枞酸 Dihydroagathic acid	0.12	0.90	0.32	0.15	45.38
枞酸型树脂酸 Abietic-type resin acid	57.55	70.57	64.30	2.32	3.61
总和 Total	68.11	80.96	74.20	2.29	3.09
树脂质量流速 Resin mass flow rate （g）	0.31	15.94	10.61	5.20	49.03
胸径 DBH （cm）	35.40	55.80	44.19	4.61	10.44

注：松脂组分的单位是%。
Note: Unit of turpentine component is %.

2.2　松脂组分与相关性状的相关性分析

将表 1 中的所有性状进行相关性分析，结果见图 1，单帖中的主要成分α-蒎烯与莰烯、水芹烯呈负相关关系，而β-蒎烯与月桂烯、柠檬烯以及单萜含量有明显的正相关关系。在二萜类组分中，

与二萜含量有关联的松脂成分有去氢枞醛、异海松酸、长叶松酸、左旋海松酸、去氢枞酸等，其中大部分属于枞酸型树脂酸。数据表明二萜含量与枞酸型树脂酸的总含量具有很强的正相关性，相比之下，与海松酸型树脂酸含量的相关性不明显。二萜类组分总含量与单萜类物质含量之间无明显关联。海松酸型树脂酸的总含量与大部分单萜组分无显著的相关性，但枞酸型树脂酸的总含量与β-蒎烯、柠檬烯呈显著负相关，还与水芹烯、草蒿脑显著正相关。

RMR 与单帖含量呈显著的正相关关系，相关系数为 0.63，与二萜类物质的含量具有弱的负相关性，相关系数仅为-0.32。所有的松脂组分中，RMR 与单萜中的β-蒎烯和月桂烯这两种成分有显著的正相关关系，与二萜中的新枞酸及枞酸型物质总含量呈较弱的负相关，但与海松酸型树脂酸无明显相关性。而胸径与单萜类组分以及树脂质量流速都无明显关联。从图中可以看出，胸径仅和二萜含量具有较弱的关联，除此之外只和枞酸型树脂酸含量和二氢枞酸呈弱的正相关关系。

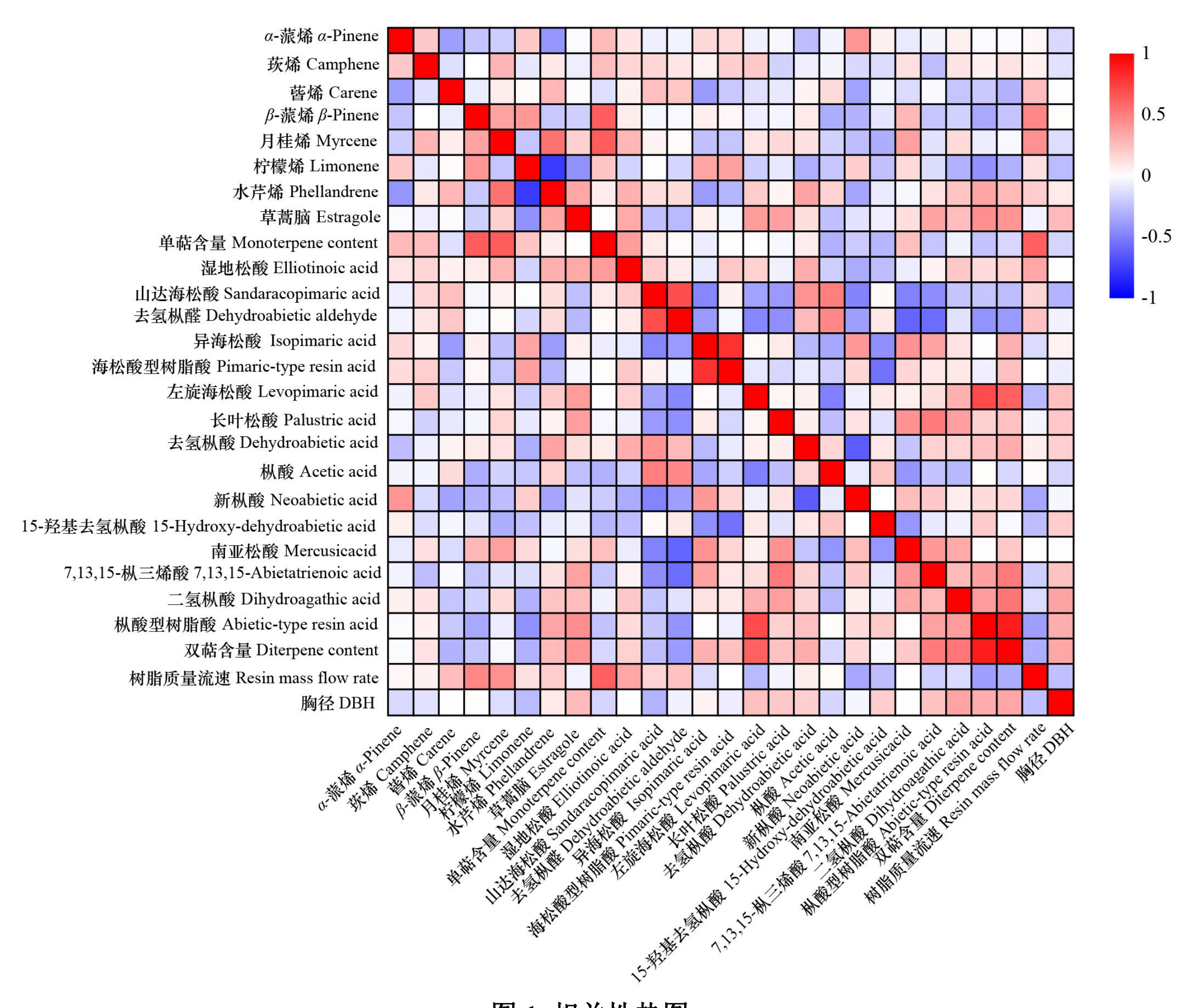


图 1 相关性热图

Fig. 1 Correlation heat map

2.3 聚类分析

结合松脂质量流速、单萜含量、枞酸型树脂酸含量、海松酸型树脂酸含量这几个指标对这 36 个无性系进行多维度评价。根据 4 个指标分别进行聚类分析，分成高中低三类，1 类为高水平组，2 类为中水平组，3 类为低水平组，并对不同分类进行多重比较，结果见表 2、图 2。根据多重比较的结果，可以看出各等级间差异显著，说明分类比较合理。

2.4 湿地松无性系产脂性状综合评价

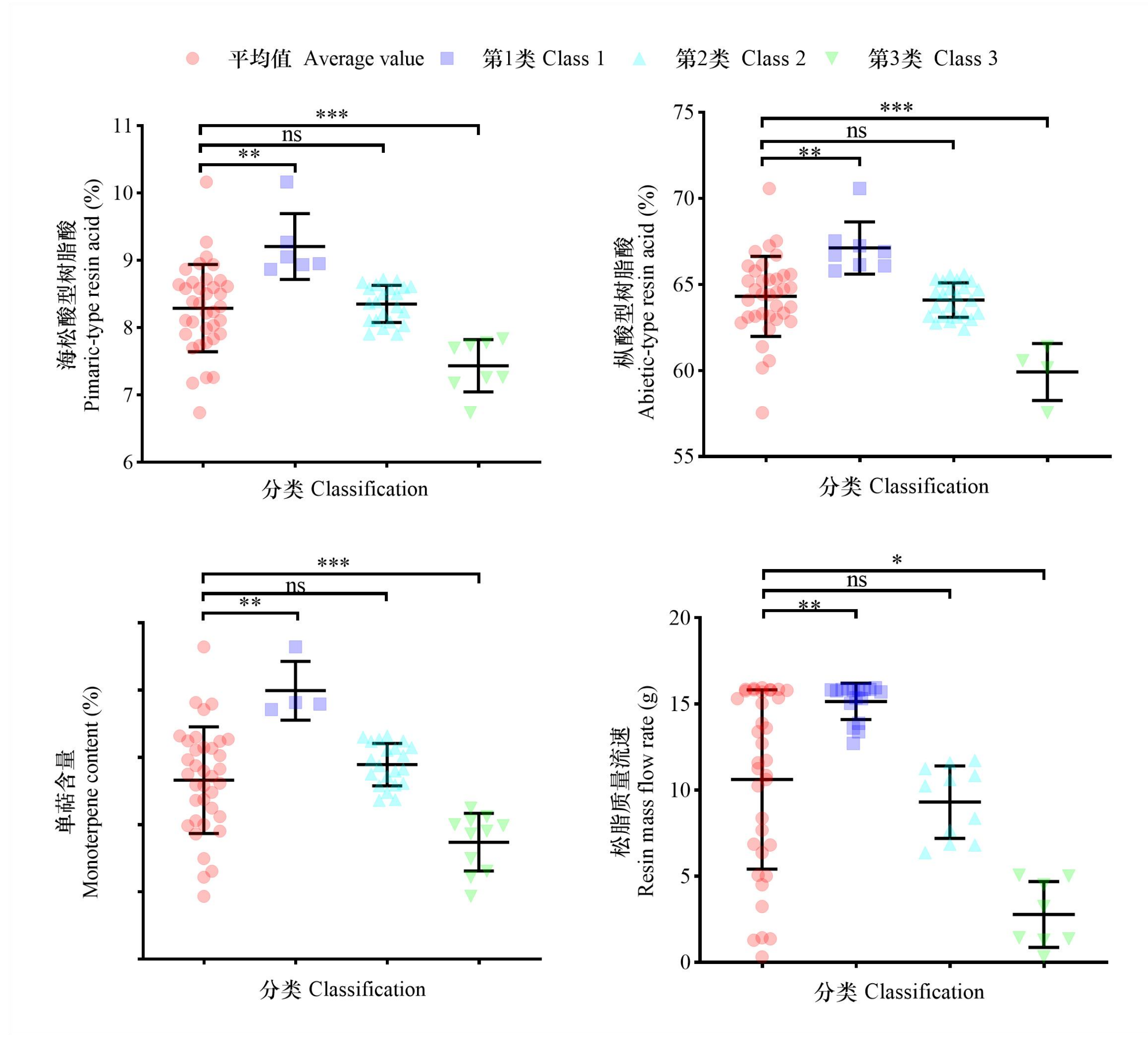
根据单萜含量的分类，1 类含 4 个无性系，分别为 6-44、4-11-1、1-38、3-64，比总体平均值高 15.4%；海松酸型树脂酸的第 1 类无性系为 1-1-1、2-191、4-11-1、3-64、2-0420、3-468，平均值为 9.21，比总体平均值高 11.1%，显著高于总体平均值；枞酸型树脂酸的第 1 组无性系的平均值为

7.12，与总平均值差异显著，高出 1.6%，包含 4-44、2-173、2-164、2-198、2-126、3-426、5-72、1-1-1 这 8 个无性系。以树脂质量流速分类，1 类的平均值为 15.15，含 17 个无性系，比总平均值高 42.79%，与其他两类的差异显著，因此第 1 类可以视为产脂力高的无性系。在产脂力高的无性系中，6-44、4-11-1、1-38、3-64 等 4 个无性系单萜含量高；4-11-1、3-64、2-0420、3-468 等 4 个无性系海松酸型树脂酸含量高；而无性系 2-173 枞酸型树脂酸含量较高（表 2，图 2）。

表 2 36 个无性系分类情况

Table 2 Classification of 36 clones

分类 Classification	1 类 Class 1	2 类 Class 2	3 类 Class 3
单萜含量 Monoterpene content	6-44、4-11-1、1-38、3-64	2-0420、1-1-1、3-468、2-198、1-31、5-21、2-9、3-265、2-126、2-191、2-24、3-55、2-31、3-142、2-150、3-3-1、4-11-5、4-15、2-173、6-42、2-28	3-426、2-113、7-14、5-72、4-47、2-142、4-44、0-867、8-18、3-18、2-164
树脂质量流速 Resin mass flow rate	6-44、4-11-1、1-38、3-64、2-142、0-867、2-0420、3-468、5-21、2-24、3-142、2-150、3-3-1、4-11-5、4-15、2-173、6-42	4-44、2-164、1-1-1、2-198、1-31、2-9、2-126、2-191、3-55、2-31、2-28	3-426、2-113、7-14、5-72、4-47、8-18、3-18、3-265
海松酸型树脂酸 Pimaric-type resin acid	1-1-1、2-191、4-11-1、3-64、2-0420、3-468	2-164、2-198、2-9、2-126、3-55、3-426、2-113、7-14、5-72、4-47、8-18、3-18、3-265、6-44、1-38、2-142、0-867、5-21、2-24、3-142、3-3-1、4-15	4-44、1-31、2-31、2-28、2-150、4-11-5、2-173、6-42
枞酸型树脂酸 Abietic-type resin acid	4-44、2-173、2-164、2-198、2-126、3-426、5-72、1-1-1	1-31、2-31、2-28、2-150、4-11-5、6-42、2-9、3-55、7-14、4-47、8-18、3-18、3-265、6-44、1-38、0-867、2-24、3-142、3-3-1、4-15、2-191、4-11-1、2-0420、3-468	2-113、2-142、5-21、3-64



ns 表示无显著差异；*表示显著性差异（P<0.05）；**表示显著性差异（P<0.01）；***表示显著性差异（P<0.001）。

ns indicates no significant differences; * indicates significant differences (P<0.05); ** indicates significant differences (P<0.01); *** indicates significant differences (P<0.001).

图 2 各等级间的多重比较

Fig. 2 Multiple comparison among different grades

3 讨论与结论

松脂成分是影响松脂质量的关键，也是高产脂选育的一个重要参考指标。本研究中湿地松无性系共检测出了 21 种成分，其中包含 8 种单萜组分，13 种二萜组分。单萜含量在 13.87%~21.29 %，平均值为 17.32%，高于 Zhang 等（2016）的研究结果（9.89%），略低于吴东山等（2018）人的研究（20.16%~25.76%），而 Lai 等（2020）研究的湿地松单帖组分含量达到了 43.42~45.32%。造成这种差异的原因可能与地理环境不同有关，Zhang 等（2016）的材料来自浙江，而吴东山等（2018）的实验材料采自广西，不同的地理环境造就不同水热条件，从而影响树脂的生物合成（Neis et al., 2018）。也有可能是遗传因素的影响，如雷蕾（2015b）等人研究发现，高产脂湿地松的单萜含量要高于普通湿地松。本研究中双萜类物质的含量为 68.11~80.96 %，含量最高的为左旋海松酸，与多数研究人员的结果一致（雷蕾等，2015b; Zhang et al., 2016）。

本研究中，湿地松单帖中的主要成分β-蒎烯与月桂烯、柠檬烯，以及松节油的含量有明显的正相关关系，表明这些性状可以同时得到改良。这种正相关关系在先前的研究中也得到证实，如，高产脂树木中β-蒎烯和柠檬烯的含量较高（Neis et al., 2019），松脂产量越高的个体，β-蒎烯/α-蒎烯的比值越高（Yi et al., 2020）。本试验发现 RMR 与β-蒎烯呈显著的正相关关系，因此，β-蒎烯也可作为高产脂无性系的选择指标之一。在二萜类组分中，RMR 与二萜中的新枞酸及枞酸型物质总含

量呈较弱的负相关，与海松酸型树脂酸无明显相关性。这表明在松脂组分定向改良时，提高枞酸型树脂酸含量可能在一定程度上降低松脂产量。此外，本试验中，胸径与单萜类组分以及松脂质量流速都无明显关联，仅与二萜含量、枞酸型树脂酸含量具有较弱的相关，这与湿地松家系产脂力的研究结果类似（李彦杰等，2012b）。

单萜中主要成分为*α*-蒎烯、*β*-蒎烯，共占单萜类物质总量的约 90%。*β*-蒎烯的变异系数要高于α-蒎烯，这一点与湿加松的研究结果一致（廖仿炎等，2022），说明*β*-蒎烯的选择潜力更大。*β*-蒎烯是湿地松主要组分中个体遗传力最高的，以 10%的入选率，也可以得到较高的遗传增益（Zhang et al., 2016）。除此之外，*β*-蒎烯在工业上的广泛用途以及抵御小蠹虫攻击的能力，也使其成为最具育种潜力的组分。*α*-蒎烯作为一种重要的单萜成分，具有多种用途，在医学上具有抗炎抗氧化地作用，可以促进伤口愈合，降低血糖，在土耳其民间也被用于治疗风湿性疼痛（Brahim et al., 2018; Santos et al., 2023）；在燃料方面还可以作为柴油的添加剂，其特殊结构有助于减少柴油燃烧产生的有害气体（Ai et al., 2022）。除此之外，其他单萜类组分也具有一定的价值，如莰烯可以作香料以及农药的原料（李思广等，2008），莰烯可以抵御松毛虫进食和产卵（Chun et al., 2007）。

湿地松二萜成分中的大多数海松酸和枞酸都处于中度的遗传控制之下（Lai et al., 2020），因此对其开展定向选育是有效的。在市场上，松香的价值虽然不如松节油，但其中的一些成分如果单独分离出来，也可以也有较高的价值，比如海松酸是一种可再生的生物聚酯材料，可用于特殊医学用途（Zia et al., 2016）。而枞酸对对乙酰氨基酚（APAP）引起的肝损伤具有保护作用，可以抑制 APAP 诱导的活化，增加 Nrf2 表达，并且可以在特殊领域用作生物航空燃料，或作为添加剂来改善传统生物喷气燃料的性能（Li et al., 2020）。作为自然界中广泛存在的一种次级代谢物，萜类成分在未来的医药、化工、食品等领域具有广泛的应用前景，尤其在绿色环保领域具有很大潜力。

在化学工业中，松脂通常是被分离成不同的组分来加以利用，而不是以聚合物的形式进行开发利用。因此，在以改良产脂性状为目的的湿地松育种计划中，不能仅以高产脂为目标。在产脂力高的基础上，也要注重松脂成分的定向改良。聚类分析可以按照定量数据将无性系分类。在加勒比松的高附加值松脂成分定向选育中，研究人员通过聚类分析筛选出了加勒比松的高*α*-蒎烯含量组、高*β*-蒎烯含量组、和高*β*-水芹烯含量组以及高单萜总含量组的无性系（谢俊康等，2022）。本研究通过聚类分析将湿地松 36 个无性系按照单萜、海松酸型树脂酸、枞酸型树脂酸含量分成高、中、低三类，高含量组比总体平均值分别高 15.4%、11.1%和 1.6%，分别含无性系 4、6、8 个。并且通过对树脂质量流速的聚类分析，将 36 个无性系按照产脂力分成了高、中、低三组，高产脂无性系组含 17 个无性系，与其他组之间差异显著。依据不同性状之间的相关性分析结果，在湿地松定向育种研究中，可以针对单一性状进行改良，也可将产脂力和松脂组分结合起来进行性状改良。在长期育种计划中，将多个性状结合能取得更大的经济收益。在产脂力高的 17 个无性系中，注重单萜含量的可以选择 6-44、4-11-1、1-38、3-64；偏重海松酸型树脂酸含量可以选择 4-11-1、3-64、2-0420、3-468 这四个无性系；如果注重枞酸型树脂酸含量，可以选择 2-173。本研究结果可以为湿地松松脂组分的定向选育提供参考依据。

参考文献：

Al ZAABI A, RAJ A, ELKADI M, et al., 2022. Variation in sooting characteristics and cetane number of diesel with the addition of a monoterpene biofuel, α-pinene[J]. Fuel, 314(Apr.15): 123082.

AN Y, LUO Q, HAN D, et al., 2023. Abietic acid inhibits acetaminophen-induced liver injury by alleviating inflammation and ferroptosis through regulating Nrf2/HO-1 axis[J]. Int Immunopharmacol, 118: 110029.

BRAHIM TUMEN, ESRA KUPELI AKKOL, D HT, et al., 2018. Research on the antioxidant, wound healing, and anti-inflammatory activities and the phytochemical composition of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait)[J]. J Ethnopharmacol, 211: 235-246.

LAI M, ZHANG L, LEI L, et al., 2020. Inheritance of resin yield and main resin components in *Pinus elliottii* Engelm. at three locations in southern China[J]. Ind Crops Prod, 144(2): 112065.

LEI L, PAN XQ, ZHANG L, et al., 2015a. Analysis and evaluation of resin compositions of high-resin-yield *Pinus elliottii* in Jiangxi province[J]. For Res, 28(6): 6. [雷蕾，潘显强，张露，等，2015a. 高产脂湿地松松节油成分的遗传变异及综合选择[J]. 林业科学研究，28(6): 6.]

LEI L, PAN XQ, ZHANG L, et al., 2015b. Analysis and evaluation of resin compositions of high-resin-yield *Pinus elliottii* in Jiangxi Province[J]. Acta Agric Univ Jiangxiensis, 37(4): 645-652. [雷蕾，潘显

强，张露，等，2015b. 江西省高产脂湿地松松脂成分分析与评价[J]. 江西农业大学学报，37(4): 645-652.]
LENG CH, ZHANG L, YI MIN, et al., 2020. Multipoint genetic correlation and path analysis of resin yield and growth and crown traits of *Pinus elliottii*[J]. J Nucl Agric Sci, 34(7): 1598-1605. [冷春晖，张露，易敏，等，2020. 湿地松产脂量与生长及树冠性状多点遗传相关及通径分析[J]. 核农学报，34(7): 1598-1605.]
LI SG, FU YB, JIANG YD, et al., 2008. Chemical composition of resin from 40 high-resin-yield *Pinus kesiya var.langbianensis* clones[J]. J West China For Sci, 37(2): 5. [李思广，付玉嫔，蒋云东，等，2008. 40 个高产脂思茅松无性系的松脂化学组成特征[J]. 西部林业科学，37(2): 5.]
Li S, Li Y, Wu J, et al., 2020. Synthesis of low pour point bio-aviation fuel from renewable abietic acid[J]. Renewable Energy, 155(Aug): 1042-1050.
LI YJ, LUAN QF, SHEN DY, et al., 2012a. Study on genetic variation of resin components among open-pollinated families of Slash Pine[J]. For Res, 25 (6): 7. [李彦杰，栾启福，沈丹玉，等，2012a. 湿地松自由授粉家系松脂组分遗传变异研究[J]. 林业科学研究，25(6): 7.]
LI YJ, JIANG JM, LUAN QF, 2012b. Determination and genetic analysis of resin productivity, resin density and turpentine content in half-sib families of slash pine[J]. J Beijing For Univ, 34(4): 4. [李彦杰，姜景民，栾启福，2012b. 湿地松家系产脂力,树脂密度和松节油含量的测定与遗传分析[J]. 北京林业大学学报, 34(4): 4.]
LIAO FY, LI YL, ZENG M, et al., 2022. Correlation Analysis of Resin Yield and Main Components of Turpentine with Growth Traits of *Pinus elliottii*×*Pinus caribaea*[J]. For Approx Sci., 38(2): 74-78. [廖仿炎，李义良，曾明，等，2022. 湿加松产脂量及松节油主要成分含量与生长性状相关性分析[J]. 林业与环境科学，38(2): 74-78.]
NEIS FA, DE COSTA F, FULLER TN, et al., 2018. Biomass yield of resin in adult *Pinus elliottii* Engelm. trees is differentially regulated by environmental factors and biochemical effectors[J]. Ind Crops Prod, 118: 20-25.
NEIS FA, COSTA FD, ALMEIDA MD, et al., 2019. Resin exudation profile, chemical composition and secretory canal characterization in contrasting yield phenotypes of *Pinus elliottii* Engelm[J]. Ind Crops Prod, 132: 76-83.
SANTOS ES, DE SOUSA MACHADO ST, RODRIGUES FB, et al., 2023. Potential anti-inflammatory, hypoglycemic, and hypolipidemic activities of alpha-pinene in diabetic rats[J]. Process Biochem, 126: 80-86.
WU DS, YANG ZQ, HUANG YL, 2019. Genetic Analysis and Selection of Basic Resin Productivity of 25-year-old *Pinus elliottii* Families[J]. Guangxi For Sci, 48(4): 438-443. [吴东山，杨章旗，黄永利，2019. 25 年生湿地松家系基本产脂力遗传分析与选择[J]. 广西林业科学，48(4): 438-443.]
WU DS, HUANG YL,YANG ZQ, 2018. Analysis and Evaluation of *Pinus elliottii* Resin Composition with Different Phenotypic Characteristics[J]. Guangxi For Sci, 47(3): 268-273. [吴东山，黄永利，杨章旗，2018. 基于不同表型特征湿地松松脂成分的分析与评价[J]. 广西林业科学，47(3):268-273.]
XIE JK, FENG YH, WU DS,et al., 2022. Analysis of pine resin components and selection of *Pinus caribaea* clones with high characteristic components[J]. J Centr S Univ For Technol., 42(10): 65-71.
[谢俊康，冯源恒，吴东山，等，2022. 加勒比松松脂组分分析及高特征组分无性系选择[J]. 中南林业科技大学学报, 42(10): 65-71.]
XU YQ, SHEN FQ, XU LY, et al., 2020. Correlation of resin yield with growth, form and wood property of *Pinus elliottii*[J]. J Zhejiang For Sci Technol, 2020, 40(1): 4. [徐永勤，沈凤强，徐卢雨，等，2020. 湿地松产脂量与生长,材性和形质性状的相关性研究[J]. 浙江林业科技，40(1): 4.]
YAN SC, XU W, YUAN HE, et al., 2007. Effects of different elicitors on olfactory response and oviposition selection of *Dendrolimus superans* (Butler)[J]. Chin J Appl Ecol, 18(7): 1583-1588. [严善春，徐伟，袁红娥，等，2007. 不同诱导因子对落叶松毛虫嗅觉和产卵选择的影响[J].应用生态学报，18(7): 1583-1588.]
YI M, JIA T, DONG L, et al., 2020. Resin yield in *Pinus elliottii* Engelm. is related to the resin flow rate, resin components and resin duct characteristics at three locations in southern China[J]. Ind Crops Prod, 160(6): 113141.
ZIA KM, Noreen A, Zuber M, et al., 2016. Recent developments and future prospects on bio-based polyesters derived from renewable resources: A review[J]. Int J Biol Macromol, 82: 1028-1040.
ZHANG JZ, SHEN FQ, JIANG JM, et al., 2010. Heritability estimates for real resin capacity and growth

traits in high-gum-yielding slash pine[J]. J Zhejiang A F Univ, 27(3): 367-373. [张建忠，沈凤强，姜景民，等，2010. 湿地松高产脂家系产脂量和生长量的遗传力估算及协方差分析[J]. 浙江林学院学报，27(3): 367-373.]
ZHANG S, JIANG J, LUAN Q, 2016. Genetic and correlation analysis of oleoresin chemical components in slash pine[J]. Genet Mol Res, 15(3): 1-12.
ZHONG GH, LIANG ZY, SHEN MY, et al., 2001. Study on the chemical composition of pine resin of *Pinus elliottii* in Guangxi Province[J]. Chem Ind For Prod, 21(3): 29-33. [钟国华，梁忠云，沈美英，等，2001. 广西湿地松松脂化学组成的研究[J]. 林产化学与工业，21(3): 29-33.]